格栅颗粒复合堆积床内流动传热的实验研究

王晶钰，杨剑，胡映学，刘衍，王秋旺

（西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室，西安 710049）

摘要：颗粒有序堆积床相比于颗粒无序堆积床具有压降较小的优点，但在实际操作中，有序堆积床的实现具有一定的难度，本文设计了一种可快速实现有序堆积的新结构，即带有格栅的复合颗粒堆积结构。采用萘升华热质比拟方法对格栅颗粒复合堆积结构中的颗粒-流体对流传热系数进行了研究。结果表明，格栅复合堆积结构相比于简单立方堆积结构，压降略高，但传热系数也有大幅度提高；而相比于无序结构，在传热系数下降不多的情况下，压降大大减低。格栅颗粒复合堆积结构的综合传热系数最高，可为堆积床的设计提供一种新的思路。

关键词：格栅颗粒复合堆积；颗粒有序堆积床；热质比拟；萘升华；对流传热

中图分类号：TK124 **文献标识码：**A

Experimental study on fluid flow and heat transfer in grille-sphere composite packed bed

WANG Jing-Yu YANG Jian HU Ying-Xue LIU Yan WANG Qiu-Wang

(*MOE Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China*)

Abstract: Structured packed beds can have a lower pressure drop compared to randomly packed beds. However, structured packed beds are hard to achieve. In the present paper, we designed a structure that can obtain a structured packed bed more easily, that is the grille-sphere composite packed bed. The flow fluid and particle-to-fluid heat transfer characteristics are experimentally investigated by naphthalene sublimation technique and the heat-to-mass analogy. Results show that firstly, compared to the simple cubic packing, the grille-sphere composite packed bed has a slightly higher pressure drop and can improve the heat transfer at the same time. Secondly, the pressure drop of the grille-sphere composite packed bed is much lower than that of randomly packed bed, while the heat transfer decreases just a little. Finally, the grille-sphere composite packed bed has the highest overall heat transfer coefficient among three packed beds. Results of the present paper provide a new method to improve the overall heat transfer property of packed beds.

Key Words: grille-sphere composite packed bed; structured; heat-to-mass analogy; naphthalene sublimation; convective heat transfer

0 前言

球形堆积床被广泛作为化学反应器和球床反应堆等而使用。Ergun[1]，Wakao 等[2]，Gunjal 等[3]，Yang 等[4, 5]对颗粒堆积床中的流动传热都进行过相关研究。颗粒堆积床的结构形式会影响其流动传热性能。颗粒无序堆积床中由于颗粒是随机排放的，流体流动通道复杂多变，因此压降很大；当流量增加时，颗粒无序堆积床的颗粒-流体对流传热系数的提高是以压降的大幅增加作为代价的，因此颗粒无序堆积床并不是最为有效的堆积形式[6]。相比于颗粒无序堆积床，颗粒有序堆积床在适当的结构下，压降可大大减小，例如简单立方堆积结构(Simple Cubic Packing, SC)[4, 5]。但由于在实际操作中，无序堆积床具有成本低，堆积结构易于实现的优点仍然被广泛使用。

针对无序堆积床和简单立方堆积结构的优缺点，本文设计了一种格栅颗粒复合堆积结构，可快速实现有序堆积。在格栅颗粒复合堆积结构中，通道首先由格栅填充，然后再在格栅通道中填充颗粒。格栅将原本的流动通道划分成了若干个小通道，由于

收稿时间：2017-03-03

基金项目：国家自然科学基金(No. 51536007, 51476124)

作者简介：王晶钰（1991--），女，博士生，主要从事堆积床热质传递研究。通信作者：王秋旺，教授 Email: wangqw@mail.xjtu.edu.cn

壁面会对颗粒产生约束，因此在壁面附近颗粒的排序是相对有序的[7]。本文正是运用这样的思路，设计出了格栅颗粒复合堆积床，在这种新结构中，颗粒排布的有序程度相对于无序结构可明显提高，因而预测其压降也会大大减小。

本文所研究的格栅单通道和球的管径粒径比为1，因此每一个通道恰好可以容纳一列球，可以看成SC结构，整个堆积结构可以看成是若干个SC结构的累加。当通入空气时，空气与球之间发生对流传热。本文将采用萘升华热质比拟方法对颗粒-球对流传热系数以及格栅颗粒复合堆积结构的压降进行研究，并将结果与无序堆积床和SC结构的压降传热结果进行对比。

1 实验系统

萘升华实验是一种通过测量萘升华过程中的质量交换率来求取对流传热系数的研究方法。本实验中工作流体为空气，气源由压缩机提供，流量用调节阀控制，气体流经实验段后排到大气中。实验系统如图1所示。实验中，空气流量和温度分别由涡街流量计和水银温度计测量，实验段前后压力由压力扫描阀测量，实验前后实验件的质量由分析天平称取，实验时间用秒表记录。实验段由有机玻璃制造，其长度为192 mm，横截面尺寸为96×96 mm；格栅由不锈钢制成，可将流动通道分为7×7个单通道；通道内填充玻璃球，其直径为12 mm。

在萘升华实验中，用萘球（模具浇铸而成）代替部分玻璃球，当对实验段吹风时，萘球升华因而质量减小，称量吹风前后萘球的质量就可以知道特定结构在特定实验条件下萘球和空气之间的传质速率，进而由热质比拟理论得到颗粒与空气之间的传热速率。实验中，为了避免入口段和出口段效应，将萘球布置在实验段中段[8]。

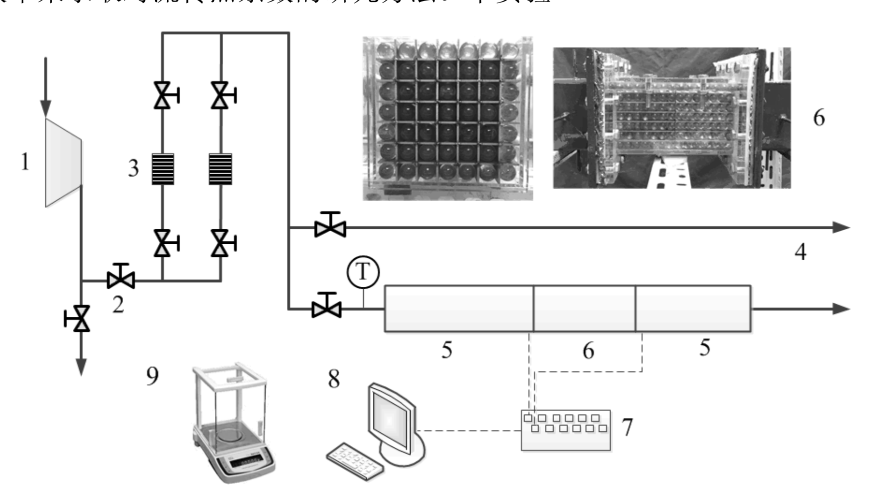


图1 实验系统图
Fig 1 The experimental setup

2 数据整理方法

下面给出整理实验数据时的基本公式。

(1) 孔隙率 ε

$$\varepsilon=\frac{V_{\rm gas}}{V_{\rm tube}}=\frac{V_{\rm tube}-V_s}{V_{\rm tube}} \tag{1}$$

式中，$V_{\rm gas}$ 为空气流通体积/m³；$V_{\rm tube}$ 为实验通道体积/m³；$V_{\rm s}$ 为实验通道中填充物的体积/m³。

(2) 雷诺数 $Re_{\rm p}$

$$Re_{\rm p}=\frac{q_{\rm V}d_{\rm p}}{\nu A_{\rm C}} \tag{2}$$

式中，ν 为气体运动粘度/m²·s⁻¹，可按纯空气计算；$q_{\rm V}$ 为空气的体积流量/m³·s⁻¹；$d_{\rm p}$ 为颗粒直径/m；$A_{\rm C}$ 为管道截面积/m²。

(3) 施伍德数 Sh

$$Sh=\frac{h_{\rm m}d_{\rm p}}{D_{\rm f}} \tag{3}$$

$$D_{\rm f}=\frac{\nu}{Sc} \tag{4}$$

$$h_{\rm m}=\frac{\Delta m}{A\tau\left(\rho_{\rm s}-\rho_{\rm s,bulk}\right)} \tag{5}$$

式中，$h_{\rm m}$ 为对流传质系数/m·s⁻¹；$d_{\rm p}$ 为颗粒直径/m；$D_{\rm f}$ 为萘在空气中的扩散系数/m²·s⁻¹；Sc 为施密特数，取为2.5；Δm 为萘的质量变化量/kg；τ 为实验时间/s；A 为升华面积/m²，取为实验容器中所有萘球颗粒表面积之和；$\rho_{\rm s}$ 为萘表面饱和蒸汽浓度/kg·m⁻³；$\rho_{\rm s,bulk}$ 为空气主流萘蒸气浓度，在实验中，$\rho_{\rm s,bulk}$=0。萘表面饱和蒸汽浓度按下式计算[9]：

$$\rho_s = 10^{(13.564-3729.4/T_w)} / (64.87T_w) \quad (6)$$

式中，T_w 为萘球表面温度/K，在这里取实验前后实验段进口的平均温度。

(4) 热质比拟公式[10]

$$\frac{Nu}{Sh} = \left(\frac{Pr}{Sc}\right)^n \quad (7)$$

式中，*Nu* 为努赛尔数；*Sh* 为施伍德数；*Pr* 为空气普朗特数；*n* 为热质类比系数，*n*=1/3；*Sc* 为施密特数。

3 结果与讨论

3.1 压降

实验中对格栅颗粒复合堆积床在不同空气流量下的进出口压降进行了测量。单位压降随雷诺数 Re_p 的变化关系如图 2 所示。可以看到，在图示的双对数坐标下，单位压降与 Re_p 之间基本呈线性增长关系，意味着随着流量的增加，堆积床中的压降增加得越来越快。

图 2 还画出了由颗粒直径为 12 mm 的球构成的 SC 堆积结构和无序堆积结构（ε=0.40）的单位压降。实线是无序堆积床的压降(Ergun 公式[1])，虚线是 SC 的压降[5]。

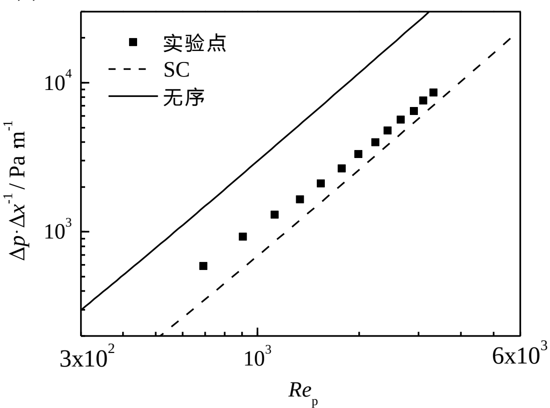


图 2 单位压降随雷诺数的变化关系
Fig. 2 Pressure drop in three packed beds

从图 2 可以知道，在相同 Re_p 下，格栅颗粒复合堆积床的压降略高于 SC 结构，同时远低于无序结构。新结构中的压降为 SC 的 1.34 倍，同时只有无序结构的 30%。格栅复合堆积床的压降高于 SC 结构的原因是该结构相比于 SC 结构多了格栅，格栅使得流体流通面积减小，同时会形成流动阻力，因此压降上升。格栅复合堆积床的压降小于无序结构的原因是，该结构仍然是有序结构，且格栅将流体的流动限制在单通道中，流动通道没有无序结构中的复杂多变，因此压降相比于无序结构小。从压降的角度看，像 SC 这样的简单，不致密的有序堆积结构可以减小堆积床的压降。

3.2 颗粒-流体对流传热系数

实验中测量了五个体积流量下，充分发展段的颗粒-流体对流传热系数，将对流传热系数整理成无量纲参数努赛尔数 *Nu* 和雷诺数 Re_p 的关系，如图 3 所示。图中同样将测量结果与具有相同颗粒直径的无序结构的 *Nu* (Wakao 公式[2])以及 SC 结构的 *Nu*[5] 进行了对比。

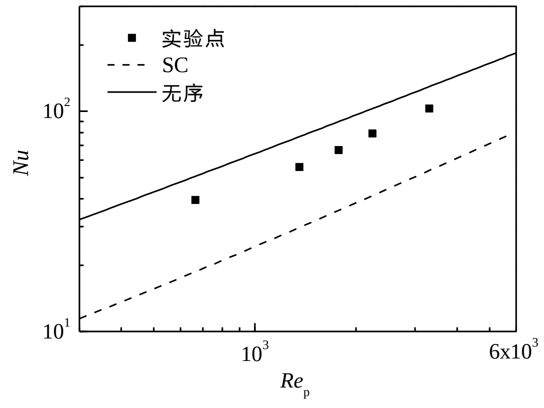


图 3 努赛尔数随雷诺数的变化关系
Fig. 3 Nusselt number in three packed beds

由图 3 可知，在相同 Re_p 下，格栅颗粒复合堆积结构的 *Nu* 低于无序结构，高于 SC 结构。新结构的 *Nu* 约为 SC 结构的 1.94 倍，可以达到无序结构的 76%。而 SC 结构虽然压降较低，但其换热也较弱，仅为无序结构的 39%。格栅复合堆积结构中 *Nu* 高于 SC 的原因是由于格栅的存在，结构中的流场发生了变化，流体在其中流动的最大速度和平均速度相比于 SC 结构都有所提升，因而传热增强；同时流体在格栅复合堆积结构中的流动被限制在单通道内，径向混掺不如无序结构，因而传热逊于后者。

从传热的角度来看，无序结构在这三种结构中拥有最优的传热性能，主要是因为无序结构的孔隙率低于 SC 结构和格栅颗粒复合堆积结构，也就是说在相同的体积下，采用无序堆积结构，可以填充更多的球，球对流体的扰动情况影响了球与流体之间的传热性能。无序结构中球的数量多，且球的排布混乱，对流动的扰动强烈，因此传热最强。

3.3 综合传热系数

由上述结果可知，仅从压降角度来看，SC 结构具有最优的压降性能，但其传热性也被大大削弱；从传热角度来看，无序结构的性能最优，但其高的传热系数是以高的压降作为代价的。新的格栅复合堆积结构相比于无序结构，在大幅度降低压降的同时保证传热没有明显减低；相比于 SC 结构，传热明

显增强，同时压降增加得也不明显。这说明，格栅复合堆积结构的压降和传热的匹配性更好。在实际中，我们往往是倾向于这种压降和传热匹配性更好的结构的，希望得到压降和传热性能都较优的结构，因此需要对综合传热系数进行评价。本文综合传热系数的定义是单位压降下的传热系数，表达式如下：

$$\gamma = \frac{h}{\Delta p / \Delta x} \tag{8}$$

图 4 比较了无序床，SC 堆积床和格栅颗粒复合堆积床的综合传热系数。由图 4 可知，在相同 Re_p 下，格栅颗粒复合堆积床的综合传热系数最高。这也就说明，本文所研究的格栅复合堆积结构确实具有优异的流动传热特性。

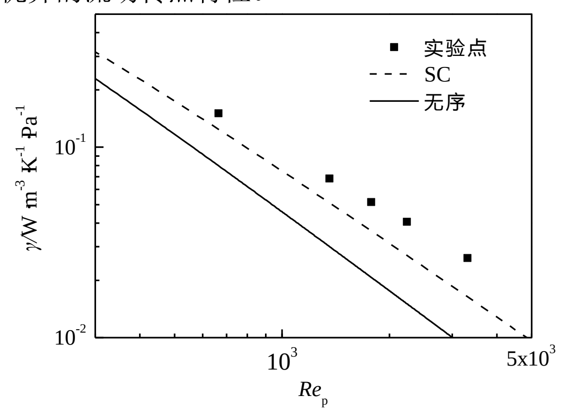


图 4 三种堆积床的综合传热系数

Fig. 4 Overall heat transfer efficiency of three packed beds

本文的研究结果为提高堆积床的流动传热性能提供了一种新思路。通过引入格栅，利用格栅壁面的约束，提高堆积床中颗粒排布的有序度，进而可以减小堆积床的压降；同时，格栅将整个流动通道划分成若干个小通道，每个通道中流体的流速相比于相同堆积结构而没有格栅时会有所提升，因而可以在一定程度上提高传热系数。

4 结论

（1）本文所设计的格栅颗粒复合堆积结构可提高无序堆积结构的有序度，快速实现较为有序的堆积；

（2）格栅颗粒复合堆积结构相比于 SC 结构，压降略高（为 SC 的 1.34 倍），同时努赛尔数大大提高（为 SC 的 1.94 倍）；

（3）格栅颗粒复合堆积结构相比于无序结构，压降大幅减小（为无序的 30%），努赛尔数却下降得不多（为无序的 76%）。

（4）格栅颗粒复合堆积结构具有最优的综合传热性能。

参考文献

[1] Ergun S. Fluid Flow through Packed Cloumns [J]. Chemical Engineering Progress, 1952, 48(2): 89-94

[2] Wakao N, Kaguei S, Funazkri T. Effect of Fluid Dispersion Coefficients on Particle-to-Fluid Heat Transfer Coefficients in Packed Beds [J]. Chemical Engineering Science, 1979, 34(3): 325-336

[3] Gunjal P R, Ranade V V, Chaudhari R V. Computational Study of a Single- Phase Flow in Packed Beds of Spheres [J]. AIChE Journal, 2005, 51: 365-378

[4] Yang J, Wang Q W, Zeng M, et al. Computational Study of Forced Convective Heat Transfer in Structured Packed Beds with Spherical or Ellipsoidal Particles [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(2): 726-738

[5] Yang J, Wang J, Bu S S, et al. Experimental Analysis of Forced Convective Heat Transfer in Novel Structured Packed Beds of Particles [J]. Chemical Engineering Science, 2012, 71(6): 126-137

[6] Romkes S, Dautzenberg F, Van den Bleek C, et al. CFD Modelling and Experimental Validation of Particle-to-Fluid Mass and Heat Transfer in a Packed Bed at Very Low Channel to Particle Diameter Ratio [J]. Chemical Engineering Journal, 2003, 96(1): 3-13

[7] Calis H, Nijenhuis J, Paikert B, et al. CFD Modelling and Experimental Validation of Pressure Drop and Flow Profile in a Novel Structured Catalytic Reactor Packing [J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56(4): 1713-1720

[8] 王晶钰，刘衍，杨剑, 等. 颗粒无序堆积床内颗粒−流体对流传热系数的研究[J]. 工程热物理学报，2016，37(10): 2202-2205

WANG Jingyu, LIU Yan, YANG Jian, et al. Study on Particle-to-fluid Convective Heat Transfer Characteristics in Randomly Packed Bed [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2016, 37(10): 2202-2205

[9] Sogin H H. Sublimation from Disks to Air Streams Flowing Normal to Their Surfaces [J]. Trans ASME 1958, 80(1): 61-69

[10] Goldstein R J, Cho H H. A Review of Mass Transfer Measurement Using Naphthalene Sublimation [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 1995, 10(4): 416-434